

Chapitre 7

La dynamique des attracteurs comme base de génération de comportements en robotique mobile autonome

7.1. Introduction

L'hypothèse centrale de l'approche dynamique en robotique mobile autonome (Schöner et Dose, 1992 ; Schöner, Dose et Engels, 1995 ; Bicho et Schöner, 1997 ; Steinhage et Schöner, 1998 ; Large, Christensen et Bajcy, 1999 ; Bicho, Mallet et Schöner, 2000) est que le comportement moteur ainsi que les représentations pertinentes nécessaires à sa réalisation doivent, d'une part, être générés de façon continue dans le temps, et, d'autre part, résister aux fluctuations ou perturbations auxquelles tout système réel est exposé. Cela conduit à une conception dans laquelle le comportement et les représentations sont les solutions stables (ou attracteurs) d'un ensemble de systèmes dynamiques, qui traduisent en temps réel l'information sensorielle en contraintes graduées et intégrables. De multiples attracteurs peuvent co-exister en présence de la même situation sensorielle. C'est l'état interne du système autonome qui décidera quel attracteur sera choisi. Le changement du nombre et/ou de la nature des attracteurs à travers des instabilités (ou bifurcations) permet au système autonome de se configurer de manière flexible selon le contexte sensoriel instantané.

L'approche est ici présentée au niveau de la génération de comportements moteurs. Dans ce cas, des variables « comportementales » représentent directement

un continuum d'états physiques du système qui sont générés par des systèmes de contrôle conventionnels. Par exemple, une variable représentant la direction dans laquelle un véhicule se déplace, peut évoluer dans le temps grâce à un système dynamique qui intègre les contraintes « acquisition de cibles » et « évitement d'obstacles ». La fusion ou sélection parmi ces contraintes est réalisée au moyen d'une dynamique non linéaire bien maîtrisée.

7.2. Approche théorique

A titre d'exemple nous étudierons ici le déplacement d'un véhicule dans un espace à deux dimensions, remplissant les contraintes d'évitement d'obstacles, d'atteinte d'une cible de coordonnées cartésiennes connues, et de contrôle de la vitesse de déplacement.

7.2.1. Evitement d'obstacles

Les contraintes de déplacement liées à l'environnement se définissent par des directions à éviter $\psi_{\text{obs},i}$ et/ou des directions à atteindre ψ_{cible} . Ces directions sont repérées sur la figure 7.1 par rapport à un repère fixe extérieur Oxy . Chaque capteur définit ainsi une direction de visée $\psi_{\text{obs},i}$ dans laquelle regarde ce capteur. Les quantités $\psi_{\text{obs},i}$ et $\psi_{\text{obs},i}$ sont indépendantes de la valeur courante de la direction de déplacement ϕ . Un système dynamique de la forme $d\phi/dt = f(\phi, \text{paramètres})$ régit l'évolution de cette variable ϕ au cours du temps. La forme de la fonction f et la valeur des paramètres sont choisies de telle sorte que le système converge à tout instant vers une solution d'équilibre stable, appelée aussi *point fixe*, pour laquelle $d\phi/dt = 0$. Les forces de répulsion virtuelles, renvoyées par les obstacles détectés, sont centrées sur les directions $\psi_{\text{obs},i}$ et sont choisies modulo 2π de la forme :

$$f_{\text{obs},i}(\phi) = \lambda_i(\phi - \psi_{\text{obs},i}) \exp \left[-\frac{(\phi - \psi_{\text{obs},i})^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad [7.1]$$

Elles sont illustrées par la figure 7.2. Les quantités $\phi - \psi_{\text{obs},i}$ sont fixes et leurs valeurs dépendent du nombre et du type de capteurs de proximité utilisés (ultrasoniques et/ou infrarouges), qui sont généralement uniformément répartis autour de la direction de déplacement ϕ . La quantité λ_i est une fonction décroissante de la distance d_i qui sépare la périphérie du véhicule d'un obstacle détecté dans la direction $\psi_{\text{obs},i}$ par le capteur i :

$$\lambda_i = \beta_1 \exp\left[-\frac{d_i}{\beta_2}\right] \quad [7.2]$$

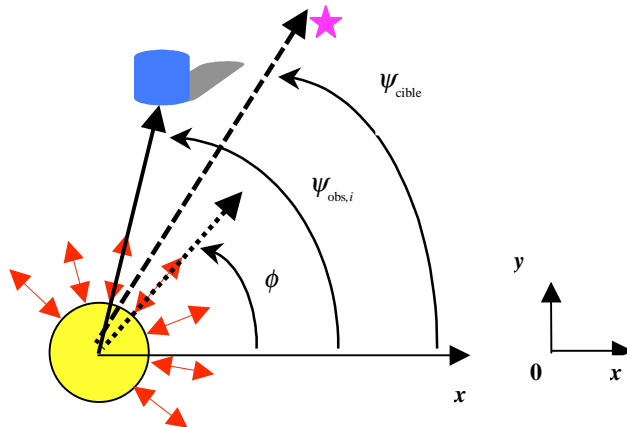


Figure 7.1. Pour l'approche dynamique, la génération de comportements moteurs consiste à donner à des variables de contrôle des valeurs dans le temps, et ce au moyen de systèmes dynamiques. La direction de déplacement ϕ d'un véhicule repérée par rapport à un axe de référence fixe extérieur est une telle variable de contrôle.

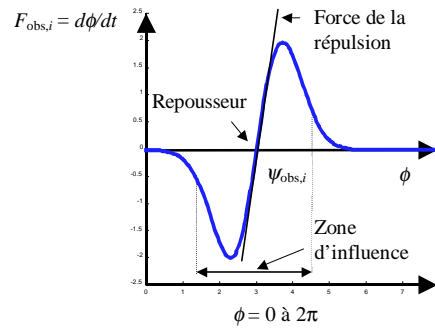


Figure 7.2. Contribution d'un obstacle repéré dans la direction $\psi_{obs,i}$. La pente positive au point fixe $d\phi/dt$ indique un point d'équilibre instable appelé aussi repousseur. Lorsque le temps croît, le système diverge à partir de cette direction $\psi_{obs,i}$ qui est à éviter

Le paramètre β_1 fixe la force maximale de la répulsion, et le paramètre β_2 détermine la décroissance de cette même répulsion en fonction de l'éloignement à l'obstacle. La quantité σ_i définit quant à elle la largeur angulaire de l'influence de l'obstacle, le véhicule devant pouvoir passer à côté de celui-ci sans collision. La projection de la sensibilité angulaire des capteurs utilisés dans le plan de déplacement du véhicule est représentée dans l'expression de σ_i par la quantité $\Delta\theta$.

$$\sigma_i = \arctan \left[\tan \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right) + \frac{R_{\text{véh}}}{R_{\text{véh}} + d_i} \right] \quad [7.3]$$

La quantité $R_{\text{véh}}$ désigne le rayon du véhicule lorsque celui-ci est assimilé à un disque plan. Les contributions individuelles de chaque capteur conduisent par sommation au calcul d'une fonction obstacle globale connue sur l'intervalle 0 à 2π .

$$f_{\text{obs}}(\phi) = \sum_i f_{\text{obs},i}(\phi) \quad [7.4]$$

7.2.2. Atteinte de la cible

La connaissance de la cible peut-être obtenue de différentes manières. Par exemple, la direction dans laquelle se situe une source sonore peut être déterminée par interpolation au moyen d'un ensemble de microphones directionnels. Ou bien encore, c'est l'utilisateur qui, au moyen d'une interface graphique adéquate, détermine la direction et la distance de la cible à atteindre. A la limite, les coordonnées du lieu à atteindre peuvent être initialement stockées en mémoire, et une estimation de la position courante du véhicule, $(x_{\text{véh}}, y_{\text{véh}})$, dans le repère fixe extérieur, permet de calculer la direction courante de la cible. Cette estimation de la position courante du véhicule est obtenue à chaque pas de calcul dt en intégrant les équations de déplacement [7.5] et [7.6], dans lesquelles v désigne la vitesse du véhicule et ϕ la direction de déplacement :

$$\frac{dx_{\text{véh}}}{dt} = v \cos(\phi(t)) \quad [7.5]$$

$$\frac{dy_{\text{véh}}}{dt} = v \sin(\phi(t)) \quad [7.6]$$

Les codeurs incrémentaux installés sur les deux arbres moteurs du véhicule permettent de disposer d'une mesure de la position de chaque roue à chaque pas de calcul. A partir de cette mesure de position de chacune des roues, on détermine la vitesse v et l'orientation ϕ du véhicule qui sont utilisées dans les équations [5] et [6]. La direction à suivre peut alors être calculée à chaque pas de calcul au moyen de la relation :

$$\psi_{\text{cible}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{cible}} - y_{\text{veh}}}{x_{\text{cible}} - x_{\text{veh}}}\right) \quad [7.7]$$

Cette direction ψ_{cible} sert alors à définir une solution asymptotiquement stable, ou attrapeur, de l'équation différentielle suivante :

$$f_{\text{cible}}(\phi) = -\lambda_{\text{cible}} \sin(\phi - \psi_{\text{cible}}) \quad [7.8]$$

L'étendue angulaire de cet attrapeur est égale à 2π , et il est à noter la présence d'un repousseur dans la direction opposée à ψ_{cible} . La figure 7.3 illustre un tel attrapeur défini par la direction $\phi = \psi_{\text{cible}}$.

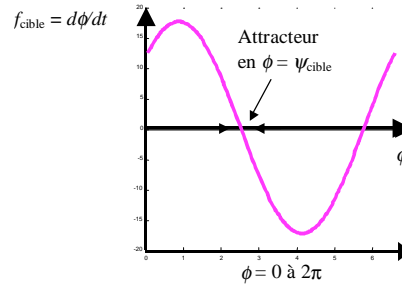


Figure 7.3. Contribution de la cible à atteindre repérée par la direction ψ_{cible} . La pente négative au point fixe $d\phi/dt$ indique un point d'équilibre stable appelé aussi attrapeur. Lorsque le temps croît, le système converge vers cette direction ψ_{cible} qui est à atteindre

7.2.3. Contrôle de la vitesse de déplacement

Puisque le véhicule se déplace dans son environnement, les données sensorielles de distance et de position varient au cours du temps. Il en va de même pour la force de répulsion λ_i des obstacles ou encore pour la zone d'influence σ_i de ces mêmes obstacles. Les repousseurs et les attrapeurs se déplacent quant à eux sur l'axe des ϕ , et leurs vitesses de déplacement doivent être suffisamment lentes pour permettre au

système global d'être à chaque instant dans un état d'équilibre stable, ou proche de l'attracteur désiré. Afin de satisfaire cet état d'équilibre, la vitesse du véhicule doit donc être contrôlée. Si le déplacement se fait à vitesse constante et latéralement à la cible, la direction ψ dans laquelle se trouve le lieu à atteindre ou l'obstacle global détecté, vue depuis la position courante du véhicule, varie en première approximation suivant :

$$\frac{\Delta\psi}{\Delta t} \propto \frac{v}{d} \quad [7.9]$$

expression dans laquelle d représente la distance à la cible, ou à l'obstacle détecté, et v la vitesse de déplacement. La quantité $\Delta\psi / \Delta t$ (rd/s) est un paramètre du modèle de navigation, et la vitesse de déplacement imposée doit satisfaire l'équation [7.9]. L'inverse de ce paramètre devra en particulier être beaucoup plus grand que le temps de relaxation de l'attracteur résultant. Un moyen simple pour contrôler la vitesse consiste alors à utiliser la relation :

$$v_{\text{obs}} = \frac{\Delta\psi}{\Delta t} \times d_{\text{min}} \quad [7.10]$$

ou

$$v_{\text{cible}} = \frac{\Delta\psi}{\Delta t} \times d_{\text{cible}} \quad [7.11]$$

dans laquelle d_{min} désigne la distance minimale mesurée et d_{cible} la distance à la cible.

7.2.4. Intégration des deux comportements

Le comportement global souhaité, évitement des obstacles et atteinte du lieu spécifié, est construit à partir de la somme des deux comportements élémentaires, et la prévalence de l'évitement d'obstacles sur l'atteinte de cible est obtenue par une relation d'ordre du type :

$$dt_{\text{Euler}} \ll 1/\lambda_{\text{obs},i} \ll 1/\lambda_{\text{cible}} \ll (\Delta\psi/\Delta t)_{\text{obs}} \ll (\Delta\psi/\Delta t)_{\text{cible}} \quad [7.12]$$

La dynamique en ϕ et en v s'obtient alors par la résolution du système dynamique suivant (Bicho, 1999) :

$$\frac{d\phi}{dt} = f_{\text{obs}}(\phi) + f_{\text{cible}}(\phi) \quad [7.13]$$

$$\frac{dv}{dt} = -c_{\text{obs}}(v - v_{\text{obs}}) \exp\left[-\frac{(v - v_{\text{obs}})^2}{2\sigma_v^2}\right] - c_{\text{cible}}(v - v_{\text{cible}}) \exp\left[-\frac{(v - v_{\text{cible}})^2}{2\sigma_v^2}\right]$$

Enfin, la connaissance de la vitesse angulaire du véhicule autour de son centre de rotation, $d\phi/dt$, et de sa vitesse linéaire, v , permet de calculer les vitesses des roues motrices droites et gauches. Ces deux quantités représentent alors les consignes du module de puissance, et sont actualisées à chaque cycle de calcul de durée dt_{Euler} .

7.3. Simulations

Dans un premier temps nous présentons le comportement de notre système dans un environnement de simulation généré par un simulateur écrit en MATLAB (Rey, 1999). La figure 7.4 illustre le type de scène utilisée. Le véhicule est représenté par un triplet (x, y, ϕ) constitué des deux coordonnées cartésiennes et de la direction de déplacement. Les coordonnées cartésiennes sont actualisées en utilisant les équations [7.5] et [7.6]. La direction de déplacement ϕ et la vitesse de déplacement v , sont obtenues par la résolution du système dynamique [7.12]. Les équations différentielles sont intégrées en utilisant une formule d'Euler avec un pas de temps fixe et une information de distance calculée une fois par cycle. Les environnements modélisés sont constitués d'objets polygonaux. Le simulateur recense pour chaque capteur i , les points d'intersection entre la direction de visée ψ_i , qui est fixe par rapport à la direction de déplacement ϕ , et l'ensemble des segments constituant la scène.

Afin de reproduire dans le plan le cône d'émission et réception d'un capteur physique, infrarouge ou sonar par exemple, chaque direction de visée ψ_i est élargie à un ensemble de dix « rayons » de visée. Le simulateur calcule enfin la distance entre le point d'intersection trouvé et le centre du véhicule. Le rayon de ce dernier est retranché, et pour chaque direction de visée ψ_i , la distance la plus courte est retenue. En position 3, la porte ouverte, ou l'absence d'obstacles dans cette direction, contribue à générer la présence d'un attracteur situé entre deux repousseurs, créés quant à eux par les deux cloisons situées de part et d'autre du véhicule. La figure 7.5 illustre la présence de cet attracteur qui existe déjà dans la contribution globale f_{obs} des obstacles.

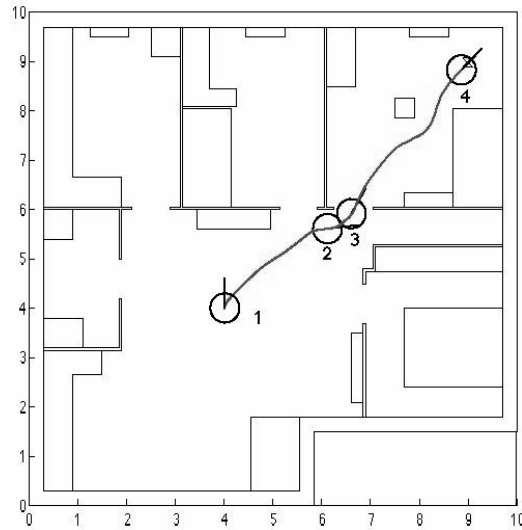


Figure 7.4. Un exemple de scène d'intérieur. Les portes ont une largeur de 0,8 m, le diamètre du véhicule est de 0,6 m. La position et l'orientation initiales (1) sont connues, le lieu à atteindre est repéré par une croix en haut à droite de la figure

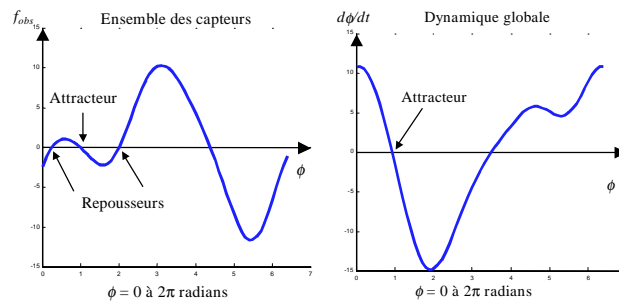


Figure 7.5. Emergence d'un attracteur entre deux repousseurs et dynamique globale en ϕ lorsque le véhicule est en position 3

La dynamique globale en ϕ est donnée par la somme de la fonction obstacle f_{obs} (voir la figure 7.5) et de la fonction cible f_{cible} (voir la figure 7.3) ce qui conduit à l'existence d'un attracteur renforcé, illustré dans la partie droite de la figure 7.5.

7.4. Validation de l'approche dynamique sur le robot expérimental ROBODYN

Notre approche a également été mise en œuvre sur des robots réels tels le robot Robodyn, conçu et réalisé par l'équipe Dynamique du Centre de recherches en neurosciences cognitives. Le robot Robodyn est un robot mobile autonome à roues, qui possède des capteurs de type émetteur-récepteur ultrason, émetteur-récepteur infrarouge et microphone, lui permettant d'évaluer des distances métriques aux obstacles environnants et de localiser des sources sonores. Des codeurs incrémentaux disposés sur les axes moteurs lui permettent en outre de connaître une estimation de sa position courante au cours de ses déplacements entre une position d'origine et une destination. Cette plate-forme robotique a permis de démontrer avec succès (Bicho, Mallet et Schöner, 1998) les comportements évitement d'obstacles, suivi de mur et atteinte de cible sonore, lumineuse ou de coordonnées cartésiennes connues, dans des environnements naturels, et sans connaissance *a priori* de cet environnement. Les trajectoires sont douces et sans collision.

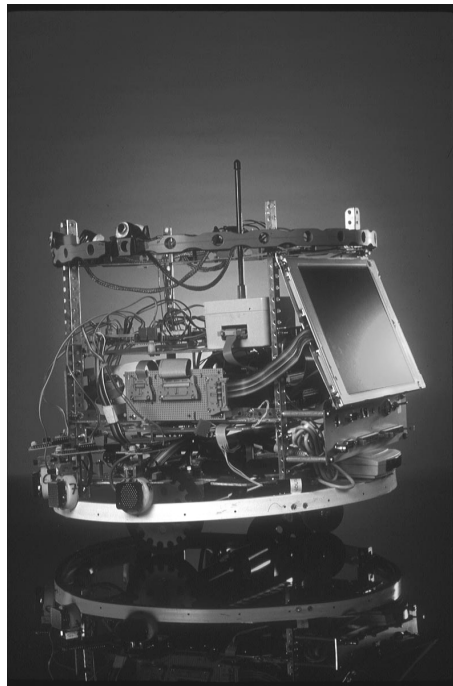


Figure 7.6. *Le robot expérimental Robodyn*

7.5. Application à la conduite d'un fauteuil roulant électrique en environnement domestique (Projet WAD)

Le projet WAD (Mallet, 2001 ; Mallet et Schöner, 2001) vise à donner une autonomie limitée aux fauteuils roulants électriques. Par rapport à d'autres méthodes, parfois coûteuses en temps de calcul et qui proposent des solutions de coopération intelligentes et efficaces entre l'homme et un ensemble de fonctions automatiques embarquées (Bourhis, Moumen, Pino, Rohmer et Pruski (1993) ; Bell, Borenstein, Levine, Koren et Jaros (1994) ; Agostini et Bourhis (1995) ; Bühler, Hoelper, Hoyer et Humann (1995) ; Mokhtari (1997)), l'approche dynamique s'avère être un moyen intéressant et original pour la génération de comportements. Le premier objectif visé est de fournir un évitement d'obstacles sécurisé, basé sur l'information sensorielle courante. Des capteurs de distance infrarouges contribuent à donner au cours du temps des valeurs à la direction de déplacement du véhicule. De plus, grâce au concept d'attracteur, *l'approche dynamique* permet d'intégrer le comportement évitement d'obstacles à celui d'atteinte d'une cible choisie de manière intermittente, évitant ainsi au pilote un contrôle continu du joystick pour définir une trajectoire.



Figure 7.7. Le prototype de démonstration du projet WAD

L'environnement est perçu à travers vingt capteurs de distance infrarouges. Leur horizon de visibilité est de 1,20 m environ et ils sont uniformément répartis à la périphérie du fauteuil comme l'illustre la figure 7.7. L'amplitude du signal infrarouge réfléchi varie avec la distance à l'obstacle détecté, mais aussi avec le type et la couleur de la cible utilisée (papier, plastique, carton, mat ou glacé, etc.), l'éclairage ambiant ou encore la température. Néanmoins, l'utilisation de filtres

infrarouges ainsi que la méthode retenue pour mesurer le rayonnement réfléchi, permettent de s'affranchir dans certaines limites des variations de la lumière du jour.

L'estimation de la position du fauteuil est obtenue au moyen de deux codeurs incrémentaux montés chacun en bout d'arbre moteur. La lecture des informations de position se fait toutes les 70 ms, intervalle qui correspond aussi au temps de cycle de calcul pour la résolution du système dynamique [7.13].

Un ordinateur portable de type PC assure les fonctions d'acquisition de données capteurs (distance et position), de liaison au module de puissance à travers l'interface DX Key, et d'interface homme machine entre le pilote et le véhicule. C'est à partir de cette interface que sont gérés :

- la commande de l'émission du rayonnement infrarouge (commande en mode pulsé et multiplexée pour des raisons d'économie d'énergie) ;
- l'acquisition des signaux image du rayonnement réfléchi par les obstacles ;
- les calculs inhérents à l'approche dynamique ;
- l'interface graphique proprement dite,
- la commande du module de puissance du fauteuil, lorsque celui-ci est dans le champ de visibilité des capteurs.

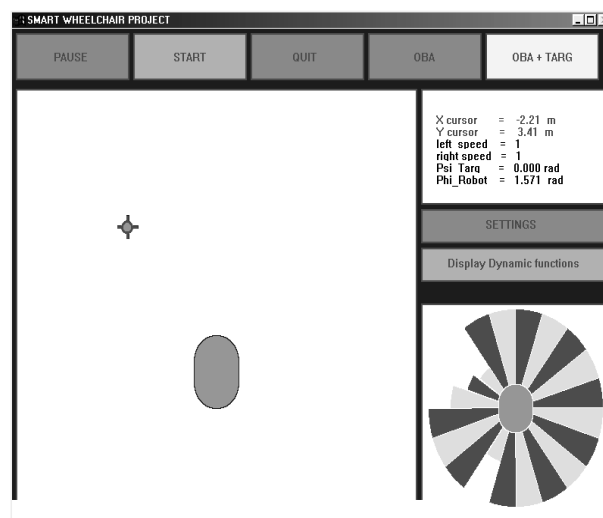


Figure 7.8. *L'interface homme-machine*

La première page de cette interface homme-machine est donnée par la figure 8. Cette interface propose un ensemble de commandes qui permettent entre autres de

choisir le fonctionnement désiré : évitement d'obstacle sécurisé seul (OBA), ou atteinte d'un lieu spécifié par l'utilisateur associé à l'évitement d'obstacle (OBA + TARG). Simultanément à ce dernier choix, l'utilisateur pointe au moyen du *touchpad* ou de la souris, les coordonnées cartésiennes de la cible à atteindre repérées par rapport à la position courante du véhicule. Entre cette position courante et celle du lieu spécifié par le pilote, le déplacement est autonome. A tout moment il est possible de modifier la direction et la distance de la cible visée corrigeant ainsi les erreurs de l'odométrie.

7.6. Discussion

Pour aller au-delà de la génération d'un simple comportement moteur et doter l'agent autonome de représentations, nous proposons le concept de *champ d'activation*, par analogie avec le codage spatial de la neurophysiologie corticale. La fonction de transition utilisée dans nos systèmes peut en effet être mise en œuvre sous forme de champ dit « neuronal ». Un tel champ donne aux représentations un aspect de continuité temporelle et de graduation dans la qualité de l'information. L'information sensorielle est décrite par des grandeurs continues indiquant par exemple la direction dans laquelle se situe une stimulation auditive ou lumineuse. Pour chaque grandeur (luminosité, son), un champ d'activation représente la présence d'une stimulation par des valeurs élevées ou l'absence de stimulation par des valeurs faibles. Dans ce champ d'activation, une entrée sensorielle est représentée par une bulle d'activation localisée sur les « neurones » codant la direction de la source de la stimulation. Le comportement et les représentations sont alors générées par un système dynamique qui détermine l'évolution temporelle de ce champ d'activation sous l'influence des stimulations actuelles, mais aussi sous l'influence d'interactions à l'intérieur même du champ. Cette dynamique du champ possède des attracteurs correspondant à l'information sensorielle, mais peut aussi intégrer plusieurs sources internes de spécification. L'amplification sélective de l'activation dans une région du champ, et la suppression de l'activation ailleurs par des mécanismes d'interaction, sont la forme la plus simple de « prise de décision ». La forme la plus simple de mémoire résulte quant à elle de la stabilisation d'une bulle d'activation même après la disparition de l'information sensorielle qui a été à l'origine de cette activation.

7.7. Bibliographie

Agostini Y., & Bourhis G. (1995, septembre). Human-oriented architecture for an intelligent powered wheelchair. In P. Kopacek (ed.), *IFAC-Workshop on DAR'S* 95 (pp. 127-132). Vienne, Autriche.

- Bell, D.A., Borenstein, J., Levine, S.P., Koren, Y., & Jaros, L. (1994). An assistive navigation system for wheelchairs based upon mobile robot obstacle avoidance. *In IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, (pp. 2018-2022). San Diego, Californie.
- Bicho, E. (1999). *Dynamic approach to behavior-based robotics: design, specification, analysis, simulation and implementation*. Aachen : Shaker Verlag.
- Bicho, E., & Schöner, G. (1997). The dynamic approach to autonomous robotics demonstrated on a low level vehicle platform. *Robotics and Autonomous systems*, 21, 23-35.
- Bicho E., Mallet, P., & Schöner, G. (1998). Using Attractor Dynamics to control autonomous vehicle motion. In IEEE Industrial Electronics Society (Ed.), *Proceedings of IECON'98* (pp. 1176-1181).
- Bicho, E., Mallet, P., & Schöner, G. (2000). Target Representation on an autonomous Vehicle with Low-Level Sensors. *The International Journal of Robotics Research*, 19(5), 424-447.
- Bourhis, G., Moumen, K., Pino, P., Rohmer, S., & Pruski, A. (1993). Assisted navigation for a powered wheelchair. *In IEEE Inter. Conf. on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 553-558). Le Touquet, France.
- Bühler, C., Hoelper, R., Hoyer, H., & Humann, W. (1995). Autonomous robot technologie for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities. *Robotics and Autonomous Systems*, 14, 213-222.
- Large, E.W., Christensen, H.I., & Bajcy, R. (1999). Scaling the dynamic approach to path planning and control: Competition among behavioral constraints. *International Journal of Robotics Research*, 18 (1), 37-58.
- Mallet, P. (2001). *L'Approche Dynamique aide à la Navigation en Fauteuil Roulant en Environnement Domestique* (Contrat ANVAR n° A0003059UAT, Rapport final). Marseille : CNRS, Centre de recherches en neurosciences cognitives.
- Mallet P., & Schöner G. (2001). Autonomous Obstacle Avoidance for Powered Wheelchairs from Low-Level Distance Sensors using the Attractor Dynamics Approach. In M. Mokhtari (Ed.), *Integration of Assistive Technology in the Information Age* (pp. 199-206). Evry : ICORR'2001 7th International Conference on Rehabilitation Robotics. (IOS Press).
- Mokhtari, M. (1997). *Intéraction homme-machine pour la compensation du handicap moteur (Application à l'Analyse Quantitative de la Télémanipulation)*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Rey, C. (1999). *Simulateur de robots autonomes base sur l'approche dynamique*. Rapport de stage de maîtrise d'informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.

Schöner, G., & Dose, M. (1992). A dynamical systems approach to task-level system integration used to plan and control autonomous vehicle motion. *Robotics and Autonomous Systems*, 10, 253-267.

Schöner, G., Dose, M., & Engels, C. (1995). Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures. *Robotics and Autonomous Systems*, 16, 213-245.

Steinhage, A., & Schöner, G. (1998). Dynamical systems for the behavioral organization of autonomous robot navigation. In McKee G.T. & Schenker P.S. (eds.), *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems: Proceedings of SPIE* (Vol. 3523, pp. 160-180).

Acquisition, 134, 143
 Agostini Y., 142, 144
 Attracteur, 133, 137, 138, 139, 140, 142, 144
 Autonomie, 142
 Bell, D. A., 142, 145
 Bicho Erlaghen, E., 133, 138, 141, 145
 Bifurcations, 133
 Borenstein, J., 142, 145
 Bourhis G., 142, 144, 145
 Capteur, 134, 136, 141, 142, 143
 Champ d'activation, 144
 Comportement, 133, 138, 139, 142, 144
 Connaissance, 136, 139, 141
 Contrainte, 133, 134
 Contrôle, 134, 135, 137, 142
 Coopération, 142
 Décision, 144
 Dimension, 134
 Dose, M., 133, 146
 Engels, C., 133, 146
 Equilibre, 134, 135, 137, 138
 Erreur, 144
 Fonction de transition, 144
 Hoelper, R., 142, 145
 Hoyer, H., 142, 145

Information, 133, 139, 142, 144
 Interactions, 144
 Koren, Y., 142, 145
 Levine, D. K., 142, 145
 Levine, S. P., 142, 145
 Mallet, P., 133, 141, 142, 145
 Mémoire, 136, 144
 Modèle, 138
 Mokhtari, M., 142, 145
 Moumen, K., 142, 145
 Navigation, 138, 145, 146
 Non-linéaire, 134
 Obstacle, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145
 Perturbation, 133
 Pino, P., 142, 145
 Point fixe, 134, 135, 137
 Pruski, A., 142, 145
 Repousseur, 135, 137
 Rey, C., 139, 145
 Robodyn, 141
 Robot, 141, 145, 146
 Rohmer, S., 142, 145
 Schöner, G., 133, 141, 142, 145, 146
 Simulation, 139, 145
 Steinhage, A., 133, 146
 Trajectoire, 141, 142
 WAD, 142